

# 關鍵基礎設施韌性 與都市永續運作

◎ 黃俊能／中央警察大學保安警察學系教授兼系主任、中央警察大學消防學系暨消防科學研究所教授

高度現代化的國家及都市，在工業、商業或日常生活上都高度依賴能源、油、電、天然氣（瓦斯）、水、化學原料、通訊、網路、金融、交通運輸等「關鍵基礎設施」（Critical Infrastructure, CI），這些設施一旦因天然災害或人為破壞而中斷，將衝擊整體國家運作及安全，也造成人民對政府信心大幅下降，近年來世界各國越趨重視提升都市韌性及永續發展，與關鍵基礎設施亦息息相關。

## 前言

2023年全球氣溫異常，極端氣候導致洪水、地震和風暴影響頻仍，根據國際災害資料庫（EM-DAT）統計：2023年重大天然災害總計366件，造成82,151人死亡，約7,939萬人受災害影響，經濟損失達1,598億美元。<sup>1</sup> 臺灣在同年遭遇6場颱風

<sup>1</sup> EM-DAT 取得資料時間為 2025 年1月24日。

及花蓮大地震，其中小犬颱風重創蘭嶼，創下極端風速記錄並造成嚴重基礎設施損害，對我農業、關鍵基礎設施及民眾生活影響甚鉅。<sup>2</sup>

## 韌性概念及重要議題

無論哪一種重大災難，都凸顯關鍵基礎設施有著重要影響與關連性，就如何滿足全社會韌性與永續都市發展，Nelson and Sterling（2012）等學者提出都市關鍵基礎設施高韌性系統效能設計的概念（圖1）。<sup>3</sup> Raymond and Priscilla在2013年都市韌性一文，提出之關鍵問題包括：<sup>4</sup>

1. 未來是否有充足的食物和乾淨飲用水之分配。
2. 石化能源和礦產資源的可用性與限制。
3. 氣候變遷與全球氣候暖化的潛在影響與效應。



關鍵基礎設施對都市的永續發展有著重要影響與關聯。Photo Credit: shutterstock

4. 大型自然災害事件實際及感知能力的提升。
5. 大型自然災害事件對關鍵基礎設施及都市環境產生的影響趨高。
6. 恐怖攻擊對關鍵基礎設施公共系統的風險增加。

A. Ji, R. He, W. Chen, and L. Zhang分析統計2001年至2022年間的千餘篇學術期刊，並結合科學計量學方法，發現近十年

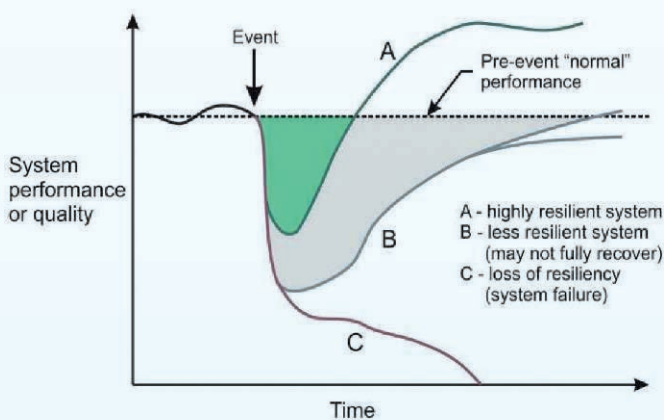


圖1 效能回應功能概念定義圖<sup>5</sup>

資料來源：Nelson and Sterling, 2012A

2 災防科技中心，「2023天然災害紀實」，關於臺灣地區颱風（如杜蘇芮、卡努、海葵、小犬等）的影響評估與災害分析。[https://den1.ncdr.nat.gov.tw/media/20084/2023-%E5%84%A9%E7%84%B6%E7%81%BD%E5%AE%B3%E7%B4%80%E5%AF%A6-%E7%B6%B2%E9%A0%81%E5%AE%9A%E7%A8%BF\\_0521\\_%E4%BA%8B%E4%BB%B6%E7%B0%BF.pdf](https://den1.ncdr.nat.gov.tw/media/20084/2023-%E5%84%A9%E7%84%B6%E7%81%BD%E5%AE%B3%E7%B4%80%E5%AF%A6-%E7%B6%B2%E9%A0%81%E5%AE%9A%E7%A8%BF_0521_%E4%BA%8B%E4%BB%B6%E7%B0%BF.pdf)

3 Nelson P. and Sterling R. 2012. *Sustainability and Resilience of Underground Urban Infrastructure: New Approaches to Metrics and Formalism*. GeoCongress 2012: pp. 3199–3208.

4 Raymond S. & Priscilla N., 2013. *City Resiliency and Underground Space Use*, Advances in Underground Space Development, The Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore), Published by Research Publishing, 43–55.

5 當天然災害或人為事件發生時，曲線A為最佳韌性系統設計，在災害事件發生初期，產生系統效能服務品質（system performance or quality）的部分失效（尚維持至少60%的服務機能），但在短期復原期程中，其系統效能服務品質可以比災害發生前還要更好，以補足解決關鍵基礎設施失效期間所喪失的服務功能；而曲線B會在發生初期，產生劇烈系統效能服務品質的失效（降至約只有30%服務機能），但經一段長期的復原期程後，尚可維持原來系統效能之服務品質；曲線C為最差的韌性系統設計，在發生初期，產生嚴重系統效能服務品質失效（立即降至15%以下服務機能），最後隨時間慢慢失去系統效能服務品質，系統亦告損壞，或因成本過高、修復期太長，以至完全無法修復使用。

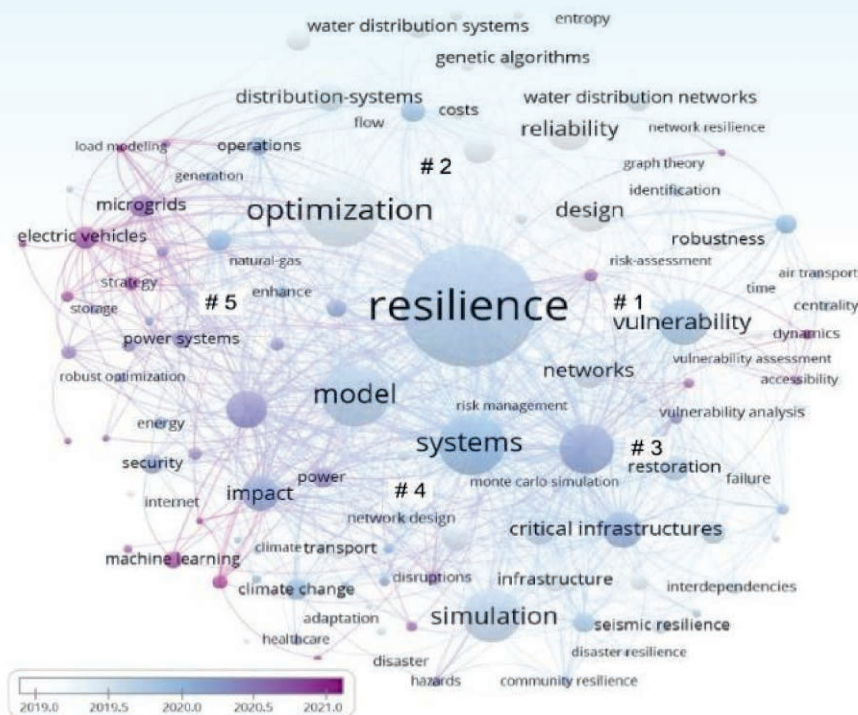


Fig. 4. Average years of the occurrence of keywords for publications under the topic of "CI resilience with computational methods".

圖2 關鍵基礎設施熱門研究議題及研究領域群集圖  
資料來源：A. Ji, R. He, W. Chen, and L. Zhang, 2024

間重要的關鍵基礎設施熱門研究主題，依序排名為韌性（resilience）、脆弱度（Vulnerability）、最佳化（optimization）、模組建構（model）、系統模擬（system simulation）、可靠度（reliability）、影響衝擊（impact）、網絡分析（network analysis）等（圖2）。<sup>6</sup> 足見都市韌性研究近幾年來迅速崛起，並成為重要研究議題。

## 韌性定義及國際標準

有關「韌性（回復力）」之國際文獻，列舉幾位學者與理論學派之定義如下：

1. 學者Hosseini及Barker（2016）定義「韌性」為「一個實體或一套系統發生重要災難破壞後，其恢復正常狀態的能力（ability）」
2. 學者Allenby & Fink（2000）定義「韌性」為：「系統在面對內外變化時保持其功能結構的能力以及在必須情況下平穩退化的能力。」
3. 學者Pregenzer（2011）定義「韌性」為：「衡量系統吸收持續的與不可預測變化並仍然保持關鍵功能的能力。」

<sup>6</sup> A. Ji, R. He, W. Chen, and L. Zhang. 2024, Computational methodologies for critical infrastructure resilience modeling: A review, Advanced Engineering Informatics, vol. 62, p. 102663, 2024, doi: 10.1016/j.aei.2024.102663.

4. Haimes (2009) 學者定義「韌性」為：  
「系統在達不到退化界限內抵抗大規模破壞以及在適當時間、合理代價與風險範圍內恢復的能力。」

5. 「關鍵基礎設施安全合作夥伴」(Critical Infrastructure Security Partnership) (2006) 描述「災害韌性disaster resilience」，定義「韌性」為：「阻止或抵禦，如恐怖襲擊等重大而多重危險之威脅事件，並且恢復與重建關鍵基礎服務使得公共安全與健康損失最小的能力。」

6. Vugrin (2010) 等學者則定義韌性為：  
「假定發生了一個特定的破壞事件（或一系列事件），那麼對於那些事件（或多個事件）來說，系統的韌性就是系統有效減少偏離的能力，即減少偏離於既定目標的系統性能水準的程度與持久度的能力。」

在過去學者對都市韌性評估屬性的影響性深度探討中，有幾個問題較值得研究：

1. 「韌性」之定義，至今依然有許多不同領域的學者各持不同見解，其學術意涵概念為何？國際上學者（含機構）之定義與看法？
2. 在都市韌性研究上，其內涵與都市韌性評估因子應包含有那些？
3. 如何衡量一個大型都市韌性的優劣，及如何找出客觀衡量標準？
4. 全社會韌性應如何衡量，及找出客觀衡量標準？

近年都市韌性的研究，多關注如何測量「韌性」（Kontokosta and Malik, 2018），透過大量文獻回顧後，學者們定義都市

韌性為：「都市系統及其所有組成的組織（包含跨功能的部門、社會、技術等），在面對動盪時保持或迅速恢復所需功能、適應變化、以及快速轉換系統的當前限制或將來自適應能力」（Meerow et al., 2016; Simone et al., 2021）。



如何迅速回復基礎建設功能，是都市韌性的主要定義之一。Photo Credit: shutterstock

國際標準組織提供衡量都市生活品質和韌性的相關指標，並廣泛應用於都市韌性評估中，如ISO 37120提供一個框架，用於衡量都市永續性和居民生活品質主要指標，內容包含19項核心與支援性主題領域指標，覆蓋主題領域如下：1.經濟；2.教育；3.能源；4.環境；5.財政；6.消防與應急；7.健康；8.避難所；9.安全；10.固體廢物；11.電信與創新；12.交通；13.都市規劃；14.廢水處理；15.水與衛生；16.災害應變；17.文化與娛樂；18.生態與生物多樣性；以及19.治理。<sup>7</sup>而這19項主題領域指標及高達100個以上的指標項目，將已通過的都市分為白金、金、銀、銅及入門5個認證等級。臺北市於2015年10月28日參與，並於2016年4月20日以2014年資料通過白金級認證，迄今每年均持續申請。<sup>8</sup>

7 <https://www.dataforcities.org/>

8 臺北市與國際都市 ISO 37120 指標。 <https://dbas.gov.taipei/News.aspx?n=7619436D0B252E0F&sms=2EE5CD8F7D427D73>

9 D. Mendonca, and W. A. Wallace, Impacts of the 2001 World Trade Center Attack on New York City Critical Infrastructures, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol.12 Issue4, P260-270, 2006



風險管理是都市永續的重要概念。Photo Credit: shutterstock



ISO 37120 是國際標準組織用於衡量都市永續性及居民生活品質的主要指標。Photo Credit: <https://blogs.gwu.edu/arcticpire/project-publications/data/>

## 都市永續重要概念— 風險管理

由於對關鍵基礎設施相依性的建模及模擬，較難對其進行驗證或確認，因此大多利用歷史資料尋找相依性的形式；例如美國911事件後，曾研究當地所有關鍵基礎設施在事件後三個月內的受損與復原情形，或者如Mendonca等學者採取逐一審視紐約時報、華爾街日報等當地報紙各篇新聞之研究方式，<sup>9</sup>尋找任何有關關鍵基礎設施服務中斷、或是服務水準降低的報導。

在審視相依性有關的新聞時，則嘗試尋找下列三問題的答案，並期待透過尋求答案之過程，掌握影響都市永續之風險因子。

1. 是什麼樣的事件讓關鍵基礎設施的服務水準降低？

2. 對於關鍵基礎設施而言，事件造成什麼樣的影響？
3. 對於這些受損的關鍵基礎設施，其中有什麼樣的相互依存性？

筆者依據國際學者在都市韌性方面文獻及國際組織發表報告，對我國主要都市（六都）進行都市韌性多性因子篩選，歸納「社會基礎設施及社群連結性」（Social

infrastructure and community connectivity），「緊急應變能力」（Contingency capacity），「經濟表現強度」（Economic strength），「環境條件」（Environmental conditions）等四個主要都市韌性構面，並擇選包括人口密度、各類人口分布、緊急避難收容安置場所人容數量等在內之24個指標，作為前開都市韌性構面之屬性因子。研究發現，影響城市韌性的關鍵屬性包括：人口密度、商業

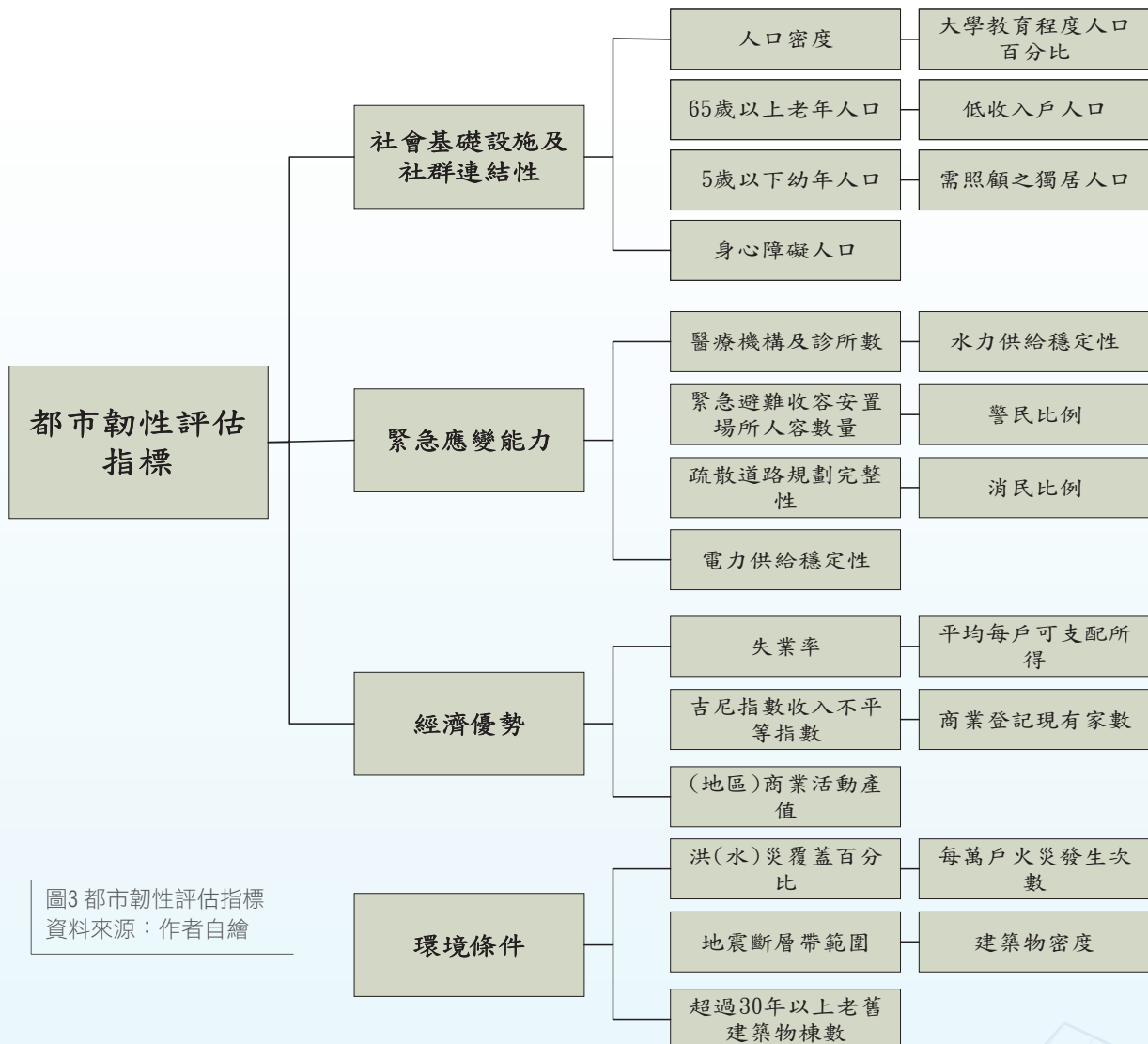


圖3 都市韌性評估指標  
資料來源：作者自繪



一個可複製備援的分散式電力能源建模框架，結合脆弱性評估、能源系統建模和網路分析，可大幅改善島嶼型國家的能源韌性。Photo Credit: shutterstock

活動產值、醫療機構數量與人力、電力供應穩定性、企業登記數等。其中在我國能源將近98%仰賴進口的高風險情況下，更凸顯電力供給穩定性對都市韌性的重要。

## 電力能源與都市韌性之重要性

Jasiūnas等學者在能源系統韌性文章回顧中，認為現代社會高度依賴持續穩定的能源供應，因此提升能源系統韌性至關重要，並提出一個全面性的防護框架，用於能源系統面臨威脅之回應策略，<sup>10</sup> 包括極端天氣、網絡攻擊及其與能源系統之交互作用，亦包含能源系統與其他關鍵基礎設施相互依賴而增加連鎖故障之風險，如大眾捷運系統癱瘓、高科技廠房生產停頓、重要醫療院所運作正常等。

我國這類島嶼國家所面臨的能源韌性挑戰，包括地理隔離（無其他國家電力連結供應）、對進口化石燃料的高度依賴、以及對氣候災害的高度脆弱性等，學者Muthukumaran認為：集中式能源系統在極端事件中極易受到干擾，導致連鎖性失效，加劇能源不安全問題，並提出一個可複製備援的分散式電力能源建模框架，結合脆弱性評估、能源系統建模和網路分析，可大幅改善島嶼國家的能源韌性；<sup>11</sup> 而識別能源基礎設施的脆弱區域，並設計適合的分散式解方，亦是重要的風險分散策略，當然對我國而言，國際間多面向的

10 Jasiūnas, J., Lund, P. D., & Mikkola, J. (2021). Energy system resilience – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476>

11 Muthukumaran, G., Passos, M. V., Gong, J., Xylia, M., & Barquet, K. (2024). Decentralized solutions for island states: Enhancing energy resilience through renewable technologies. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101439.

能源採購及提高能源戰備存量，亦刻不容緩。

## 結語與建議

都市韌性全災害管理思維，不僅是災難發生時需要進行的救災回應，更是進一步建構完整有效的預防預警措施，這種思維已改變原先傳統的被動式緊急救災管理法則（Paula, 2004）。<sup>12</sup>從美國「國家關鍵基礎設施防護計畫」（NIPP）架構來看，美國主導中央部會、地方政府、及私部門產業，利用風險策略管理手段來進行各項風險控管，

包含風險辨識、評估、分析決策、執行與控制以及資源分配等；而國內目前在關鍵基礎設施風險評估面向，缺乏一套較量化且邏輯科學的方式，能提供風險評估的客觀依據，美國政府作法，可以成為我國借鑑，而電力系統、天然氣供給、供水系統等穩定性，在國際情勢嚴峻及戰略物質競爭情況下，我國更應特別強化能源韌性。

都市人口過度集中，是許多國際學者對都市韌性探討的重要指標，而相關文獻皆提到人口密度及組成對都市韌性的重大影響，其中多著重於弱勢人口在面臨天然災害時，具有較高脆弱度及低韌性等現向（Cutter et al. 2008a; 2008b; 2010; 2014）。改善對策方面，國外學者則是提出考慮都市移居之可能性，遷移部分人口或政府單位，可以解決一國的經濟發展不均衡、都市災害加乘等問題，並強化都市韌性，世界上如韓國國會2003年12月通過《新行政首都特別法》，為韓國遷都提供法律保障等遷都計劃案例。

我國在地震帶嚴重威脅下，建物分布狀況會影響地震相關災害之衝擊程度及應變復原能力，是衡量都市韌性的重要指標；一般而言，建物數量與屋齡愈高，都市韌性則較低；反之，建物結構較強者，都市韌性預期則為正向關係（Huang et al., 2013）。<sup>13</sup>改善策略則建議加速都市更新腳步，並導入防災型都市建築規劃，以強化都市韌性與防災能力，以上有關都市韌性因子及建議，政府均應審慎評估，就國情及實際狀況，酌予納入施政方向。



導入防災型都市建築規劃，以強化都市韌性與防災能力，是都市韌性全災害管理思維的重要方向。Photo Credit: shutterstock

<sup>12</sup> Paula, S. 2004. *Regional public-private partnerships – Addressing Critical Infrastructure Interdependencies and Homeland Security Preparedness*, Presentation at the 2004 PNWER Annual Summit, Victoria BC. July 14.

<sup>13</sup> Huang C. N. et al., 2013. *A method for exploring the interdependencies and importance of critical infrastructures*, Knowl. Based Syst. (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.knsys.2013.10.010>